Thermodynamique industrielle

Ce chapitre va permettre de reprendre les résultats vu en thermodynamique différentielle avec ou sans changement d'état, pour les systèmes ouverts et en écoulement pour étudier les machines thermiques en utilisant les diagrammes thermodynamiques. Nous allons repartir de quelques définitions de base et élargir aux cas particuliers des moteurs, réfrigérateurs et pompes à chaleur.

1 Machines thermiques

Définition :

Une **machine thermique** permet de réaliser des échanges énergétiques grâce à un fluide en contact avec les différentes parties de la machine.

Remarques :

Le système étudié sera donc toujours le fluide.

Vu les conventions thermodynamiques, le travail et les transferts thermiques seront donc toujours compter positivement quand ils sont reçus par le fluide et négativement s'ils sont fournis par le fluide.

Les machines thermiques peuvent être séparées en deux catégories :

- les **moteurs** : ces machines ont pour but de donner un travail mécanique à l'extérieur, le travail reçu par le fluide est donc négatif
- les **récepteurs** : le fluide de ces machines reçoit du travail du milieu extérieur, le travail reçu par le fluide est donc positif. Leur but est de réchauffer (pompe à chaleur) ou refroidir (réfrigérateur) le plus efficacement une certaine partie de la machine.

La plupart des machines thermiques que nous étudierons seront **dithermes**, c'est-à-dire qu'elles fonctionnent avec deux sources (de températures différentes), souvent appelées source chaude (de température T_c) et froide (de température T_f). Elles fournissent respectivement les transferts thermiques Q_c *et* Q_f. L'étude d'une machine thermique commence donc par repérer les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques.

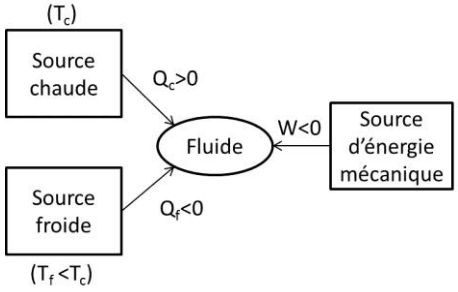
Ces échanges dans les différentes parties de la machine peuvent être lus ou repérés grâce à un cycle sur un diagramme thermodynamique (diagramme de Clapeyron ou entropique). Le sens du parcours de ces cycles nous renseignera sur le fonctionnement de la machine : moteur ou récepteur.

2 Moteurs thermiques

2.1 Description des échanges d'énergie

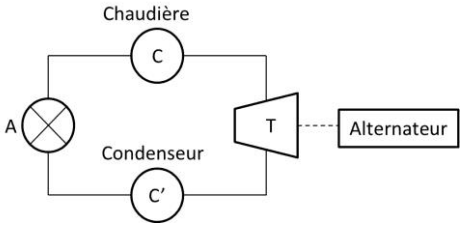
Principe :

Le transfert thermique se fait naturellement de la source chaude vers la source froide au travers du fluide circulant dans les tuyaux de la machine. En réalisant ce transfert naturel, le fluide peut entraîner une pièce mécanique mobile et donc engendrer un travail mécanique.



2.2 Exemple de cycle moteur : Turbomachine avec changement d'état

On considère une installation comportant une chaudière C, une turbine T, un condenseur C', et une pompe A.



Le fluide utilisé est l'eau, il décrit le cycle suivant :

- La pompe alimentaire amène le fluide saturant, pris à la sortie du condenseur (état A), jusqu'à la pression P_1 de la chaudière. Cette opération est pratiquement adiabatique et on peut considérer qu'à la sortie de la pompe le fluide est liquide (état B) pratiquement à la température T_2 du condenseur. On admet que le travail massique mis en jeu dans la pompe est négligeable devant celui fourni par la turbine.

- L'eau est alors injectée dans la chaudière où elle se vaporise de façon isobare (P_1). A la sortie de la chaudière, la vapeur est saturante sèche à T_1 (état C).

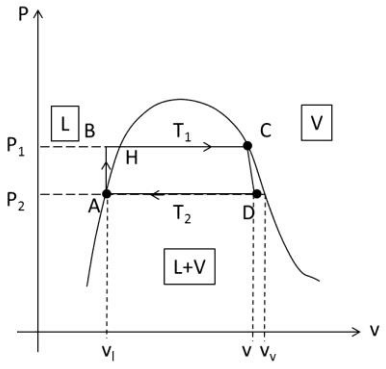
- Elle subit ensuite une détente adiabatique et réversible dans une turbine T (partie active du cycle). A la sortie de la turbine, le fluide est à la température T_2 et à la pression P_2 du condenseur (point D), où il achève de se liquéfier de façon isobare (point A).

Données :

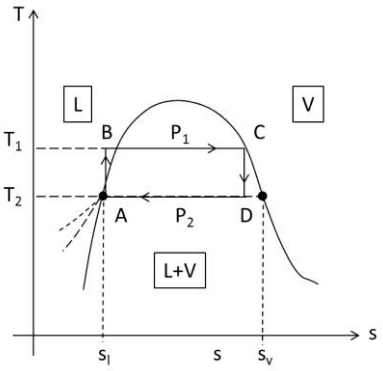
- $T_1 = 523$ K
- $T_2 = 293$ K
- Enthalpie de vaporisation à 523 K : $l_1 = 1714$ kJ.kg^{-1}
- Pression de vapeur saturante à 523 K : $P_1 = 39{,}7.10^5$ Pa
- Pression de vapeur saturante à 293 K : $P_2 = 2300$ Pa
- Enthalpie massique du liquide saturant à 293 K sous P_2 : $h_l = 84$ kJ.kg^{-1}
- Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche à 293 K sous P_2 : $h_v = 2538$ kj.kg^{-1}
- Chaleur massique du liquide : $c_{liq} = 4180$ J.kg^{-1}.K^{-1}
- Volume massique du liquide : $v_{liq} = 10^{-3}$ m^3.kg^{-1}
- Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche à 523K sous P_1 : $h_C = 2800$ kJ.kg^{-1}

2.2.1 Tracé du cycle dans un diagramme thermodynamique

Prenons dans un premier temps le diagramme de Clapeyron :



Observons aussi son tracé dans un diagramme entropique :



On remarque que dans les deux cas le cycle est parcouru dans le sens horaire : on a bien affaire à un moteur.

2.2.2 Etude de chacun des éléments du moteur

Pompe alimentaire : $h_B - h_A = w_{i,\,pompe} + q_{e,\,pompe} = w_{i,\,pompe} \ll w_{i,turbine}$

Chaudière : $h_C - h_B = w_{i,chaudière} + q_{e\,,chaudière} = q_{e\,,chaudière} = l_1 + c_{liq}\,(T_1 - T_2) > 0$

Turbine : $h_D - h_C = w_{i,turbine} + q_{e,turbine} = w_{i,turbine}$

Condenseur : $h_A - h_D = w_{i,condenseur} + q_{e,condenseur} = q_{e,condenseur} = x_D(h_l - h_v) < 0$

où x_D est le titre massique du mélange liquide-vapeur au point D

2.2.3 Expression du rendement

Le rendement d'un moteur thermique s'exprime de la sorte :

$$\eta = \frac{travail\ \ fourni}{transfert\ thermique\ \ provenant\ de\ la\ source\ chaude} = -\frac{W}{Q_c}$$

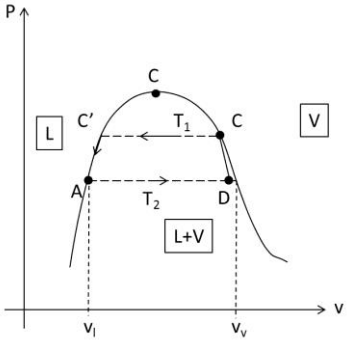
Le signe moins est nécessaire pour obtenir un rendement positif. C'est donc le rapport de la puissance utile sur la puissance coûteuse. Un rendement est toujours inférieur à 1.

Dans notre cas, le rendement se mettrait donc sous la forme : $\eta = -\frac{w_{i,turbine}}{q_{e,chaudière}} = -\frac{h_D - h_C}{h_C - h_B}$

Or, on connait : h_C=2800 kJ.kg^{-1} et $h_C - h_B = l_1 + c_{liq}(T_1 - T_2) = 2675 kJ.kg^{-1}$

Il nous reste donc à trouver h_D avec : $h_D = h_A - x_D(h_l - h_v) = h_l + x_D(h_v - h_l)$ soit la règle des moments en termes enthalpiques.

Or, le titre massique n'est pas connu, on va donc le déduire de la transformation se déroulant dans la turbine. Cette transformation est adiabatique réversible ou encore isentropique : $s_D = s_C$. On va alors utiliser le cycle fictif CC'AD suivant pour trouver x_D :



de C à C' : $s_{C'} - s_C = -\frac{l_1}{T_1}$;

de C' à A : $s_A - s_{C'} = c_{liq} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$;

de A à D : $s_D - s_A = x_D \frac{h_v - h_l}{T_2}$

Alors, le titre en vapeur est égal à : $s_D - s_C = -\frac{l_1}{T_1} + c_{liq} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + x_D \frac{h_v - h_l}{T_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad x_D = 0,68$

D'après la règle des moments : $h_D = h_l + x_D(h_v - h_l) = 1753 kJ.kg^{-1} \quad \Rightarrow \quad h_D - h_C = -1047 kJ.kg^{-1}$

Le rendement est donc de : $\eta = -\frac{\omega_i}{q} = 0,39$

On peut le comparer au rendement de Carnot (cycle réversible), on a : $\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 0,44 > \eta$

La puissance typique fournie par ce genre d'installation est d'une centaine de kW, ce qui nous donne un débit massique de l'eau au niveau de la turbine de : $D_m = \frac{P}{w_i} = 0,096 kg.s^{-1} \approx 100 g.s^{-1}$

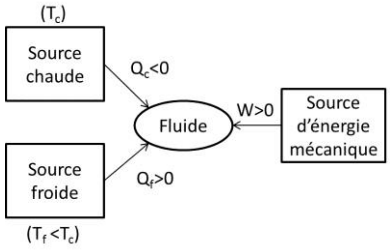
3 Réfrigérateurs et pompes à chaleur

Ces deux machines font partie de ce qu'on appelle des récepteurs thermiques. Les échanges d'énergie en leur sein sont donc les mêmes, mais dans le cas du réfrigérateur, on s'intéressera à la source froide, tandis que dans le cas de la pompe à chaleur, on s'intéressera à la source chaude.

3.1 Description des échanges d'énergie

Principe :

Le fluide reçoit du travail de l'extérieur et un transfert thermique de la source froide pour en céder un à la source chaude. Cette situation est l'inverse de celle des transferts thermiques spontanés entre un corps chaud et un corps froid, d'où la nécessité de fournir un travail.

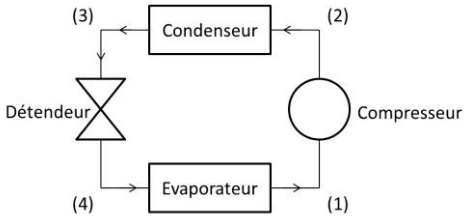


3.2 Réfrigérateur

3.2.1 Principe de fonctionnement

Un réfrigérateur exploite les changements d'état d'un fluide, ce qui permet des transferts thermiques bien plus intenses.

Supposons qu'en un certain point du cycle, le fluide soit sous forme gazeuse. Un compresseur comprime ce gaz de manière à augmenter sa pression et sa température jusqu'à commencer à obtenir un liquide.



Le fluide passe alors dans un condenseur avec une température un peu supérieure à l'air ambiant. Le fluide va alors céder un à l'air (source chaude) un transfert thermique, ce qui provoque sa liquéfaction.

Ensuite, le fluide entre dans le détendeur à l'état liquide. Il y a subit une détente qui fait diminuer sa pression et sa température, jusqu'à le transformer partiellement en vapeur. Le fluide pénètre alors dans l'évaporateur situé au contact du compartiment à réfrigérer (source froide), avec une température légèrement inférieure au compartiment réfrigéré. Un transfert thermique a donc lieu vers le liquide et provoque sa vaporisation. Le travail fourni à la machine sert donc à alimenter le compresseur.

3.2.2 Exemple de cycle

On peut résumer cette description par exemple par le cycle suivant :

- de (1) à (2) : le fluide est à l'état de vapeur saturante sèche à la température T_1. Il subit une compression adiabatique réversible le menant à la pression P_2. Cette transformation est donc isentropique et mène à un état de vapeur sèche.

- de (2) à (3) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et une source chaude. Dans l'état (3), le liquide est saturant à la pression P_2.

- de (3) à (4) : le fluide subit une détente isenthalpique (adiabatique). L'état (4) ramène à la même pression que l'état (1). On notera x_4 le taux de vapeur correspondant.

- de (4) à (1) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et la source froide (enceinte réfrigérée).

Données :

- à l'état (3) : $P_3 = 15 bar \; et \; T_3 = 333 K$

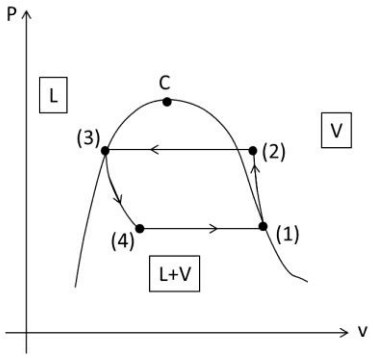
- à l'état (4) : $P_4 = 2,2bar \; et \; T_4 = 266K$

- on lit sur un diagramme ou dans une table thermodynamique, les enthalpies massiques suivantes : $h_l(T_3) = 98kJ.kg^{-1}$ $h_v(T_3) = 208kJ.kg^{-1}$ $h_l(T_4) = 30kJ.kg^{-1}$ $h_v(T_4) = 182kJ.kg^{-1}$

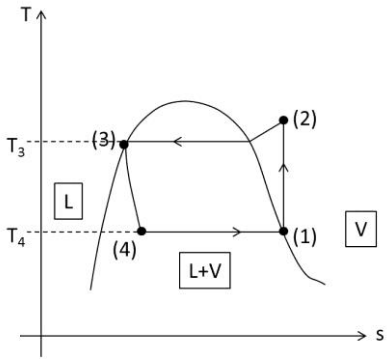
- à l'état (2) : $h_2 = 217kJ.kg^{-1}$

3.2.3 Tracé du cycle dans un diagramme thermodynamique

Prenons dans un premier temps le diagramme de Clapeyron :



Observons aussi son tracé dans un diagramme entropique :



On remarque que dans les deux cas le cycle est parcouru dans le sens anti-horaire (ou trigonométrique) : on a bien affaire à un récepteur.

3.2.4 Etude de chacun des éléments du récepteur

Compresseur : $h_2 - h_1 = w_{i,compresseur} + q_{e,compresseur} = w_{i,compresseur} > 0$

Le travail indiqué est positif. Le compresseur est alimenté électriquement et fourni donc un travail au fluide.

Condenseur : $h_3 - h_2 = w_{i,condenseur} + q_{e,condenseur} = q_{e,condenseur} < 0$

Le transfert thermique est négatif. Le transfert thermique a lieu du fluide vers la source chaude à la température T_3.

Détendeur : $h_4 - h_3 = w_{i,détendeur} + q_{e,détendeur} = 0$

C'est une détente de Joule-Thomson.

Evaporateur : $h_1 - h_4 = w_{i,évaporateur} + q_{e,évaporateur} = q_{e,évaporateur} > 0$

Le transfert thermique est positif. Le transfert thermique a lieu de la source froide à la température T_4 vers le fluide.

3.2.5 Expression de l'efficacité

L'efficacité d'un réfrigérateur est donnée par :

$$\varepsilon_f = \frac{transfert\ thermique\ provenant\ de\ la\ source\ froide}{travail\ reçu} = \frac{Q_f}{W}$$

C'est donc le rapport de la puissance utile sur la puissance coûteuse. Une efficacité est toujours supérieure à 1.

Dans notre cas, l'efficacité se mettrait donc sous la forme : $\varepsilon_f = \frac{q_{e,évaporateur}}{w_{i,compresseur}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$

Or, on connait : $h_2 = 217kJ.kg^{-1}$ et $h_1 = h_v(T_4) = 182kJ.kg^{-1}$

Il nous reste donc à trouver h_4 avec : $h_4 = h_l(T_3) - x_4\left(h_v(T_3) - h_l(T_3)\right)$ soit la règle des moments en termes enthalpiques ou plus simplement : $h_4 = h_3 = h_l(T_3) = 98kJ.kg^{-1}$.

L'efficacité est donc de : $\varepsilon_f = \dfrac{q_{e,évaporateur}}{w_{i,compresseur}} = \dfrac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = 2,4$

On peut la comparer à l'efficacité de Carnot (cycle réversible), on a : $\varepsilon_{\max} = \dfrac{T_f}{T_c - T_f} = 4 > \varepsilon_f$

On peut vérifier l'irréversibilité du cycle, en appliquant le deuxième principe de la thermodynamique pour un système ouvert : $\Delta s = s_{ech} + s_{créé}$. On peut calculer l'entropie massique échangée sur les transformations 3-2 et 1-4 : $s_{ech,32} = \dfrac{q_{e,condenseur}}{T_3} < 0 \quad et \quad s_{ech,14} = \dfrac{q_{e,évaporateur}}{T_4} > 0$. Sur la totalité du cycle, la variation d'entropie est nulle et donc :

$\Delta s = s_{ech} + s_{créé} = s_{ech,32} + s_{ech,14} + s_{créé} = 0 \quad \Rightarrow \quad s_{créé} = -s_{ech,32} - s_{ech,14} = 416J.K^{-1}.kg^{-1}$

3.3 Pompe à chaleur

3.3.1 Principe de fonctionnement

Une pompe à chaleur fonctionne exactement sur le même principe qu'un réfrigérateur. Sauf que l'on s'intéresse ici à la source chaude, l'intérieur d'une habitation et que le but est de la réchauffer donc de lui fournir un transfert thermique. La source froide peut être l'extérieur (pompe à chaleur air/air) ou le sol (pompe à chaleur géothermique).

3.3.2 Expression de l'efficacité

L'efficacité d'une pompe à chaleur est donnée par :

$$\varepsilon_c = \frac{transfert\ thermique\ \ fourni\ à\ la\ source\ chaude}{travail\ reçu} = -\frac{Q_c}{W}$$

Le signe moins est nécessaire pour obtenir une efficacité positive. C'est donc le rapport de la puissance utile sur la puissance coûteuse. Une efficacité est toujours supérieure à 1. Cette efficacité exprime le fait qu'utiliser une pompe à chaleur permet de donner ε_c fois plus d'énergie à la source que l'on chercher à réchauffer qu'un radiateur électrique (récepteur monotherme) pour une consommation électrique donnée.

L'efficacité maximale d'une pompe à chaleur est (cycle réversible) : $\varepsilon_{\max} = \dfrac{T_c}{T_c - T_f}$

3.3.3 Exemple de pompe à chaleur

Une pompe à chaleur fonctionne entre l'air extérieur de température fixe $T_a = 283K$ et la pièce à chauffer de température T. Initialement, la pièce est à la température T_a et on désire la chauffer jusqu'à la température $T_{fin} = 293K$. La pièce possède une capacité thermique $C = 6.10^6 J.K^{-1}$ et est supposée bien calorifugée.

Pour réchauffer la pièce, le fluide doit donc lui fournir un transfert thermique : $\delta Q_c = -CdT \quad \Rightarrow \quad Q_c = C\left(T_a - T_{fin}\right)$. Dans le cas où le cycle est réversible, l'efficacité maximale de cette pompe à chaleur est de : $\varepsilon_{\max} = \dfrac{T_{fin}}{T_{fin} - T_a} = 29$. Ce résultat est bien sûr surévalué dû aux

nombreuses causes d'irréversibilités possibles. L'efficacité typique est aux alentours de 4. Cela correspond à un travail de : $W = -\frac{Q_c}{\varepsilon_{\max}} = 15.10^3 kJ$. Pour une pompe à chaleur qui consomme environ 1kW, il faudra alors : $\Lambda t = \frac{W}{P} \approx 4h$, là où un radiateur électrique de même consommation prendrait : $\Delta t' = -\frac{Q_C}{P} \approx 17h$.

4 Coefficient de performance de la machine

Définition :

Quelle que soit l'installation, motrice ou réceptrice, on définit le **coefficient de performance** (COP) comme le rapport de la puissance utile sur la puissance couteuse :

$$COP = \frac{P_{utile}}{P_{couteuse}} \quad (1)$$

Remarque :

Cela s'appelle aussi le rendement pour les moteurs ou l'efficacité pour les récepteurs.